

발전설비확장계획에서 다중대안 리트로핏 모형화 방안 및 사례연구*

정 용 주**

<목 차>

| | |
|-----------------------|-----------------|
| I. 서론 | 3.3 공사기간 및 용량확장 |
| II. 리트로핏 모형화 연구 | IV. 결과분석 |
| III. 다중대안 리트로핏 모형화 방안 | V. 결 론 |
| 3.1 기본 다중대안 리트로핏 모형화 | 참고문헌 |
| 3.2 수명연장 | <Abstract> |

I. 서론

전력통계정보시스템에 의하면 2020년 국내 발전설비 가운데 25년 이상 가동된 준 노후발전소는 전체 설비의 약 45%에 해당하는 150여기에 해당한다. 또 발전기의 약 20%는 일반적 설계수명 30년을 넘겨 가동되고 있다 (<http://epsis.kpx.or.kr>). 일찍 발전설비를 구축한 선진국일수록 발전소 노후화는 빠를 수밖에 없다. 전 세계 발전설비 가운데 30년 이상 가동된 설비의 비중은 20%에 머물고 있으나 OECD 국가는 그 비중이 70%에 달하는 것으로 알려져 있다.

노후 발전설비는 기계적 특성상 효율과 출력이 저하되고 각종 부위에서 발생하는 예기치

않은 고장은 운영상의 불안감을 주고 있다. 발전소 운영의 문제와 더불어 특히 노후 발전설비의 상당부분이 석탄 화력발전소이기 때문에 온실가스 및 미세먼지 배출의 주범으로 인식되면서 노후 발전설비에 대한 관리의 중요성이 높아지고 있다.

국가마다 예방적인 차원에서 특별한 설비결합이 아니더라도 노후설비에 대한 대규모 성능개선 공사 등 대안을 마련하고 그 타당성을 검토하고 있다. 국내에서도 80~90년대 건설된 국내 노후 발전기들은 설계수명 만료 도래에 앞서 리트로핏 타당성을 이미 착수한 상태다. 화력발전 공기업 5개사가 운영중인 20기의 500MW 표준화력은 90년대에 건설돼 가동년수가 모두 20년을 초과했다. 중부발전 등은 보

* 이 논문은 부산외국어대학교 2019년도 교내학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

** 부산외국어대학교, G2융합학부, chungyj@bufs.ac.kr(주저자, 교신저자)

령 3호기를 시범으로 리트로핏 실증사업을 추진한 뒤 동일 나머지 호기로 공사를 확대한다는 계획이다(송병훈, 2015).

노후발전 설비에 대한 대책으로는 발전소 조기폐기(early retirement), 성능개선(retrofit, 리트로핏), 대체건설(repowering) 등이 있다(한국중부발전 블로그(<https://blog.komipo.co.kr/581>)). 조기폐기는 발전소의 수명이 되기 전에 아예 문제가 되는 발전소를 폐기함으로써 문제의 근원을 없애는 것으로 발전량 감소에 따른 대안 발전량이 늘어야 한다. 또 다른 대안으로 많이 거론되고 있는 리트로핏은 기존 설비에 부품 교체 등의 공사를 통하여 효율향상, 출력증대 등의 효과를 꾀하는 동시에 온실가스 배출량을 감축하는 것을 목표로 한다. 리트로핏은 비용이나 시간적인 여유가 없어 기존 설비를 신기술이 적용된 신규설비로 대체하기 어려운 상황에서 효율적인 대안이 될 수 있다. 대체건설은 현재 발전소를 폐기하고 새로운 발전소를 건설하는 것으로 부지확보의 부담이 줄어들고 송전선로를 건설할 필요가 없어 사회적 갈등비용과 환경훼손을 최소화할 수 있다는 장점이 있지만 공사기간이 길고 공사기간 동안의 발전공백이 발생한다는 단점을 지니고 있다. 모형의 관점에서는 세 가지 대안이 큰 차이가 없기 때문에 본 연구에서는 세 가지 대안을 모두 리트로핏 범주에 포함된 것으로 간주한다.

본 연구는 발전설비확장계획(generation capacity expansion planning: GCEP) 모형에서 다수의 리트로핏 대안 중에서 리트로핏 대상 기술을 선택해야 하는 상황을 모형화하는 방법을 제시한다. 기존의 연구(Gardumi, 2016; Chung et al., 2019)에서의 접근법을 단순화함

으로써 다중대안을 고려할 수 있도록 하였다. 또한, 기존 연구의 잔존수명이 긴 발전소가 잔존수명이 짧은 발전소보다 먼저 리트로핏 되는 문제를 해결하기 위하여 잔존수명이 짧은 발전소가 먼저 리트로핏 되도록 강제하는 제약식을 추가하였다. 이 제약식은 이진변수를 포함하고 있어 결론적으로 본 연구에서 다루는 최적화 모형은 혼합이진계획(mixed binary programming) 문제가 된다.

또한, 국내 발전부문 자료를 기반으로 본 연구의 모형을 적용하여 석탄발전소에 대한 리트로핏이 어떤 식으로 이루어지는지를 분석하였다.

II. 리트로핏 모형화 연구

GCEP는 “주어진 공급신뢰도의 제약 하에 미래의 전력수요를 최소의 비용을 만족시킬 수 있는 연도별 발전기 공급능력과 발전믹스의 결정”으로 정의된다(정용주, 2019). GCEP을 요약하면 <표 1>과 같다.

표에서와 같이 GCEP의 핵심적인 의사결정 변수는 언제 어떤 새로운 발전소를 지을 것인가 또 발전소를 얼마나 가동해서 얼마만큼의 전력을 생산할 것인가이다. 기본 에너지 균형식 외에도 국가 전력 수급 정책 및 지리적 또는 물리적 제약사항 등이 발전설비 설치와 가동에 영향을 주는 요소로 작용한다. 예를 들어, 우리나라는 계획예비전력으로 22% 이상을 유지하여야 하는데 이는 전력 설비 총용량이 피크시 부하의 122% 이상이 되어야 한다는 것을 의미하는데 이 조건에 따라 실제로는 거의 가동되

<표 1> GCEP 요약 ((정용주, 2019)에서 발췌)

| | |
|----------------------|---|
| 목적함수 (objective) | 비용 최소화: 발전소별 투자비, 변동운영비, 고정운영비 등 |
| 결정변수 (variables) | 발전원별 신규 설비 발전원별 가동률 예비율 제공 설비 |
| 제약식 (constraints) | 기본 에너지 균형식 (balance equations) 국가 전력 수급 정책 및 제약 - 신재생공급의무화(RPS; renewable portfolio standard) 제약 - 온실가스 배출 제약 - 전력 공급 예비율(reserve) 제약 - 발전원 별 설비 계획(예: 탈원전 정책) 등 |
| 패라미터(parameters) | 발전원별 비용 발전원별 수명 타임 슬라이스 (time slice) 구분 전력공급 예비율 연도별 수요 및 피크수요 등 |

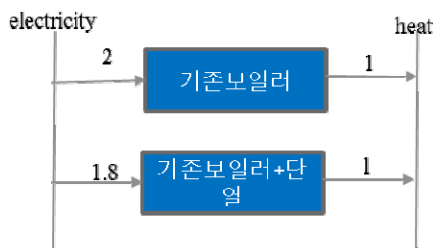
지 않더라도 예비전력으로 설치되는 경우도 발생한다.

리트로핏이 발전부문에서 중요한 의사결정 중의 하나로 추가되었고 GCEP 모형에서도 이를 반영하여야 한다는 것을 의미한다. 즉 <표 1>에서 리트로핏을 결정하기 위한 의사결정 변수가 추가되고 리트로핏과 관련된 제약식이 추가되고 기존 제약식의 일부분이 수정되어야 한다. 이때 리트로핏을 정확하게 모형화하기 위해서는 수명연장없이 효율개선 또는 연료대체 등의 효과가 있는 경우 리트로핏 효과와 더불어 기존 발전소의 잔존 수명 동안만 가동한다는 것을 반영할 수 있도록 모형이 유연하여야 한다. 물론, 수명연장 효과가 있는 경우도 반영할 수 있어야 한다.

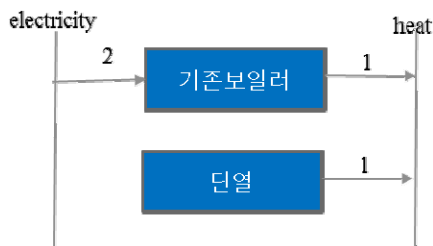
GCEP를 위한 상향식 수리모형에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔지만 노후발전 설비를 개선하여 재사용하는 리트로핏에 대한 연구는 미미한 수준이다. 에너지 및 환경과 관련된 건물, 발전 등의 분야에서 리트로핏의 효과에 대

한 실증적 연구가 이루어져 왔으나(장경룡 등, 2016; 이지현 등, 2016; 송병훈 2015; Finkenrath, 2012; MIT, 2019) 리트로핏 모형화와 관련된 연구는 미진한 수준이다. 먼저 건물 부문에서의 단열공사가 모형의 관점에서 발전소 리트로핏과 유사하다. 즉, 단열공사도 전력 부문에서의 리트로핏공사와 마찬가지로 건물과 별도로 존재하는 것이 아니라 건물에 추가되는 것이기 때문에 건물이 폐기되면 단열도 같이 폐기되어야 한다. 단열공사를 통하여 냉난방 에너지 소비를 줄이고 따라서 온실가스 배출을 절감할 수 있기 때문에 단열공사는 건물 부문에서 주요 감축수단으로 사용되고 있다(UK MARKAL, 2007; Swan, 2009; Lenox 2013; Kannan, 2009). <그림 1>은 건물부문에서 단열을 모형화하는 대표적 방법을 나타낸다. (a)에서 기존 보일러와 단열이 하나로 합쳐진 기술은 동일한 난방서비스를 제공하는데 더 적은 에너지를 사용하고 있음을 알 수 있다. 합쳐진 기술이 기존 기술을 대체하게 되는 경우 에

너지 사용량을 절감할 수 있다. 리트로핏을 정확하게 모형화하기 위해서는 기존 기술의 수명이 다하기 전에 합쳐진 기술이 이를 대체할 수 있도록 하는 조기폐기 기능이 추가되어야 하고 합쳐진 기술이 대체한 기존 보일러의 잔존 수명기간 동안만 가동하도록 하여야 한다. 그러나 기존의 연구에서 이러한 기능은 구현되지 않았다. (b)의 경우 단열기술이 별도의 난방서비스를 제공하는 것으로 가정하는 것으로, 단열로 인하여 기존 보일러가 가동시간을 줄일 수 있고 따라서 에너지 사용량을 절감하도록 하는 모형이다. 그러나 이러한 모형은 기존 보일러와 단열이 연결간의 연결관계가 없어 기존 보일러의 수명 동안만 단열이 가동해야 한다는 리트로핏 제약을 충족시킬 수 없다.



(a) 기존 보일러와 단열을 하나의 기술로 표현

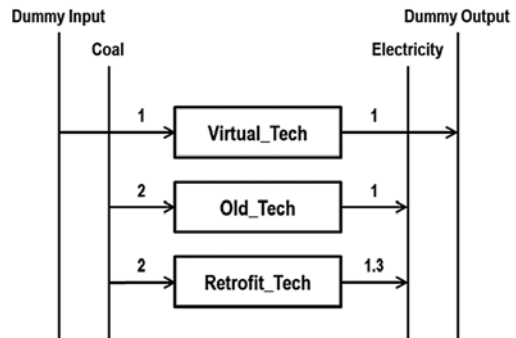


(b) 단열을 별도의 기술로 표현

<그림 1> 건물부문에서 단열 모형화 방법

리트로핏의 모형화에 대한 본격적인 연구는 비교적 최근에 시작되었으며 따라서 매우 미진한 상황이다(Gardumi, 2016, Chung et al.,

2019). Gardumi(2016)은 공개 모형인 OSeMOSYS(open source energy modelling system; <http://www.osemosys.org>)를 이용하여 리트로핏을 처음으로 모형화하였으며 Chung et al.(2019)은 이를 확장하여 수명연장, 용량확대 등 리트로핏에 따른 부수적인 효과도 반영할 수 있도록 수리적으로 모형화하고 한국의 사례를 바탕으로 리트로핏 및 부수적인 효과의 온실가스 배출량, 비용 등에 대한 영향을 분석하였다. <그림 2>는 Chung et al.(2019)에서 리트로핏을 모형화하기 위한 RES(reference energy system)를 나타낸다. 리트로핏의 수명제약을 강제하기 위하여 가상기술을 도입하고 가상의 입출력 요소를 추가하였다.



<그림 2> 단일대안 리트로핏 모형화 방법
(Chung et al.(2019)에서 발췌)

기존 연구(Gardumi, 2016; Chung et al., 2019)의 문제점은 공통적으로 리트로핏 대안이 하나인 경우만을 고려하여 리트로핏 대안이 여러 개인 경우를 모형화하기 어렵다는 것이다. 또한, 리트로핏 대상이 되는 기존 기술들 중에 잔존 수명이 긴 기술이 잔존 수명이 짧은 기술보다 먼저 리트로핏 되는 문제점을 안고 있다.

예를 들어, 두 석탄 발전소의 잔존 수명이 각각 5년, 20년이고 연료, 효율 등 나머지는 동일한 규격을 가지고 있을 경우 기존 연구의 결과들은 잔존 수명이 20년인 석탄 발전소를 먼저 리트로핏 하게 된다.

본 연구는 기존 연구의 한계를 극복하여 리트로핏 대안이 여러 개인 상황을 모형화하는 방법과 수명연장, 용량확대 등의 부수적인 효과를 모형에 반영하는 방법론을 제시하고자 한다. 또한, 리트로핏 순서에 있어 왜곡된 결과를 도출하는 문제점을 해결하기 위한 방법론을 제시한다.

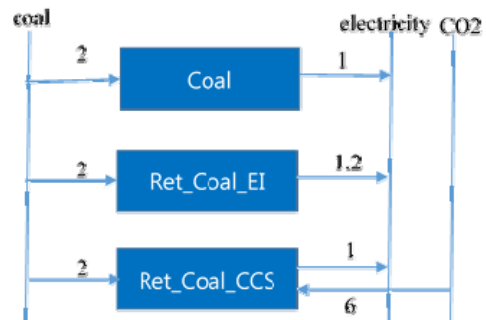
또한 기존 에너지 모형을 사용하여 리트로핏을 모형화하기는 어렵기 때문에 OSeMOSYS를 GAMS 코드 (<http://www.gams.com>)로 변환하여 직접 수리적 모형을 구현하고 cplex (<https://www.ibm.com/kr-ko/products/ilog-cplex-optimization-studio>)로 최적해를 구하였다. 본 연구에서 사용하는 주요 변수와 파라메타는 기존연구(정용주, 2019; Chung et al., 2019)를 참조하고 자세한 내용은 생략하도록 한다.

Ⅲ. 다중대안 리트로핏 모형화 방안

3.1 기본 다중대안 리트로핏 모형화

본 연구에서는 리트로핏 후보 기술이 여러 개인 상황에서 리트로핏을 할 것인지 또 한다면 어떤 리트로핏 기술로 할 것인지를 결정하기 위한 모형을 수식으로 표현하고자 한다. 예를 들어 노후화된 석탄발전소를 성능개선 리트로핏 공사를 통하여 기존 석탄발전소보다 성능이 향상된 발전소로 가동할 수 있으며 또 다른

대안으로 CCS(carbon capture storage) 리트로핏 공사를 통하여 공기중으로 배출되던 이산화탄소를 포집하고 저장함으로써 이산화탄소 배출량을 줄일 수 있는 두 가지 리트로핏 대안이 있다고 가정하자. 편의상 리트로핏 공사기간은 0년이며 수명연장이나 용량확장 등의 효과는 없는 것으로 가정한다. 아래 그림은 다른 기술들은 배제하고 멀티 리트로핏과 관련된 기술만으로 도식화한 RES이다. 리트로핏 대상인 석탄 발전소('Coal' 기술로 표시)는 석탄 2단위를 사용하여 전기 1단위를 생산하고 있다. 성능개선 리트로핏 공사에 의하여 개선된 발전소('Ret_Coal_EI' 기술로 표시)는 석탄 2단위를 사용하지만 기존 석탄발전소 보다 20% 성능이 향상된 1.2단위의 전기를 생산한다. CCS리트로핏 공사에 의하여 개선된 발전소('Ret_Coal_CCS' 기술로 표시)는 기존 발전소와 동일하게 석탄을 연료로 하고 동일한 효율을 가지고 있지만 CCS 기능을 추가하여 배출된 이산화탄소를 포집함으로써 이산화탄소 배출량을 줄이게 된다. 물론 리트로핏 공사에는 비용이 수반된다. 의사결정권자의 관심은 리트로핏을 해야 하느냐 또 리트로핏을 한다면 둘 중에 어떤 대안으로 언제 해야 하는가를 결정하는 것이다.



<그림 3> 리트로핏 관련 RES

우선, 리트로핏과 관련이 없는 일반적인 기술 t 의 총 용량(TotalCapacityAnnual)은 식 (0) 과 같이 신규로 설치된 용량의 합과 잔여용량을 합친 것으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{TotalCapacityAnnual}(y, t) &= \sum_{i=1}^y \text{NewCapacity}(i, t) + \text{ResidualCapacity}(y, t) \end{aligned} \quad (0)$$

멀티 리트로핏 상황을 모형화하기 위하여 본 연구에서는 리트로핏과 관련되어 있는 세 기술 (Coal, Ret_Coal_EI, Ret_Coal_CCS)의 총 용량과 관련된 식(0)을 식 (1)~(5)로 수정한다. 먼저 리트로핏 후보기술에 정의되는 New Capacity($i, \text{Ret_Coal_EI}$)은 i 년도에 기술 ‘Ret_Coal_EI’으로 리트로핏한 기술 ‘Coal’의 용량을 나타낸다. 또한, 리트로핏 후보기술에 정의되는 RetireCapacity($i, \text{Ret_Coal_EI}$)은 리트로핏 되었다가 수명이 다하여 i 년도에 폐기되는 리트로핏 기술 ‘Ret_Coal_EI’의 용량을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{TotalCapacityAnnual}(y, \text{Coal}) &= \sum_{i=1}^y \text{NewCapacity}(i, \text{Coal}) + \text{ResidualCapacity}(y, \text{Coal}) - \text{TotalCapacityAnnual}(y, \text{Ret_Coal_EI}) - \text{TotalCapacityAnnual}(y, \text{Ret_Coal_CCS}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{TotalCapacityAnnual}(y, \text{Ret_Coal_EI}) &= \sum_{i=1}^y \text{NewCapacity}(i, \text{Ret_Coal_EI}) - \sum_{i=1}^y \text{RetireCapacity}(i, \text{Ret_Coal_EI}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{TotalCapacityAnnual}(y, \text{Ret_Coal_CCS}) &= \sum_{i=1}^y \text{NewCapacity}(i, \text{Ret_Coal_CCS}) - \sum_{i=1}^y \text{RetireCapacity}(i, \text{Ret_Coal_CCS}) \end{aligned} \quad (3)$$

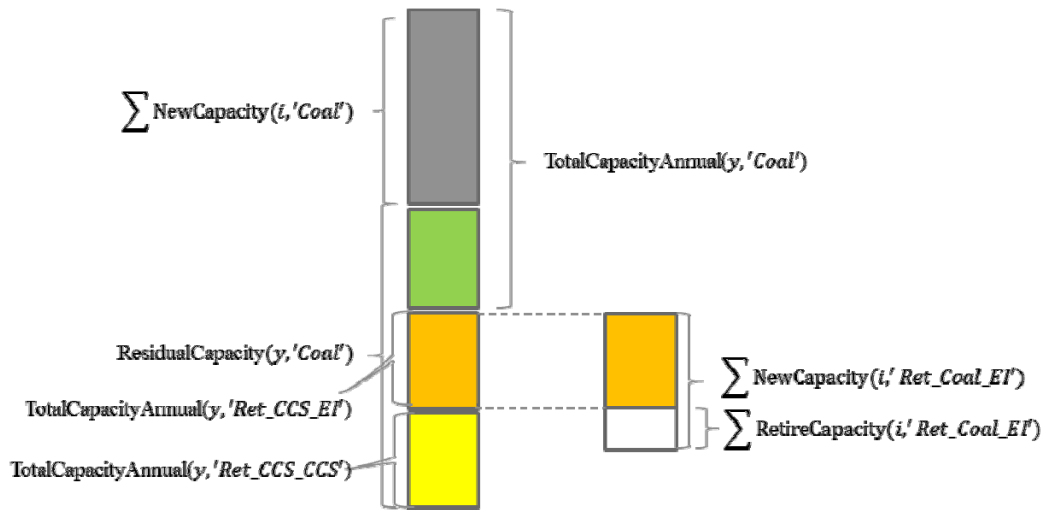
$$\begin{aligned} \text{ResidualCapacity}(y, \text{Coal}) - \text{TotalCapacityAnnual}(y, \text{Ret_Coal_EI}) - \text{TotalCapacityAnnual}(y, \text{Ret_Coal_CCS}) &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ResidualCapacity}(y, \text{Coal}) - \text{ResidualCapacity}(y-1, \text{Coal}) &\geq \text{ResidualCapacity}(y, \text{Ret_Coal_EI}) + \text{ResidualCapacity}(y, \text{Ret_Coal_CCS}) \end{aligned} \quad (5)$$

<그림 4>에서 보는 바와 같이 식 (1)에서 좌변의 리트로핏 대상이 되는 ‘Coal’기술의 총 용량은 식 (0)에서 정의된 총 용량에 대한 정의에서 리트로핏되어 사용중인 용량(즉, Total CapacityAnnual($y, \text{Ret_Coal_EI}$)+Total CapacityAnnual($y, \text{Ret_Coal_CCS}$))) 만큼 차감해 주어야 한다는 것을 의미한다.

식 (2)는 리트로핏 후보 기술인 ‘Ret_Coal_EI’의 총 용량과 관련된 것이다. <그림 4>에 표현된 것처럼 식 (2)의 좌변항인 ‘Ret_Coal_EI’의 총 용량은 누적 리트로핏 용량($\sum_{i=1}^y \text{New Capacity}(i, \text{Ret_Coal_EI})$)에서 누적 폐기용량($\sum_{i=1}^y \text{ResidualCapacity}(i, \text{Ret_Coal_EI})$)을 차감하면 된다는 것을 의미한다. ‘Ret_Coal_CCS’ 기술에 대한 총 용량도 식 (3)과 동일한 방식으로 표현된다.

식 (4)는 총 리트로핏된 용량(Total Capacity Annual($y, \text{Ret_Coal_EI}$)+Total Capacity Annual($y, \text{Ret_Coal_CCS}$)))은 기존 석탄발전소의 잔여용량(ResidualCapacity(y, Coal)))보다 적어야 한다는 관계식이다. 이는 <그림 4>에서 보는 바와 같이 기준년도 이후에 기존 석탄발전소인 ‘Coal’기술로 신규 설치된 설비는 리트로핏의 대상의 아니며, 기준년도에 이미 설



<그림 4> 리트로핏 관련 균형방정식 표현

치되어 있던 석탄발전소만이 리트로핏 대상임을 의미한다.

또한 식 (5)의 좌변항은 리트로핏에 관계없이 y년도에 폐기되는 총 용량을 의미하여 당연히 리트로핏되어 y년도에 폐기되는 용량을 나타내는 우변항보다 커야 한다.

Chung et al.(2019)는 ‘Virtual_Tech’라는 가상의 기술과 $\text{RealResidualCapacity}(y,t)$ 등의 가상의 변수를 추가적으로 도입하여 기존 기술과 리트로핏 기술간의 용량관계를 표현하고 있으나 본 연구에서는 추가적인 기술도입 없이 추가적인 변수 정의를 최소화하여 리트로핏 관계식을 수리적으로 모형화하였다. 또한, 두 개의 리트로핏 대안 중에 어떤 것을 선택할 것인지를 판단하기 위해서는 단일대안 리트로핏 모형에서는 각각의 대안에 대하여 실험하고 두 결과를 비교해야 하는데 본 연구의 다중대안 리트로핏을 활용하면 한 번의 실행으로 두 대안의 효과를 비교할 수 있다. 물론, 대안의 수가

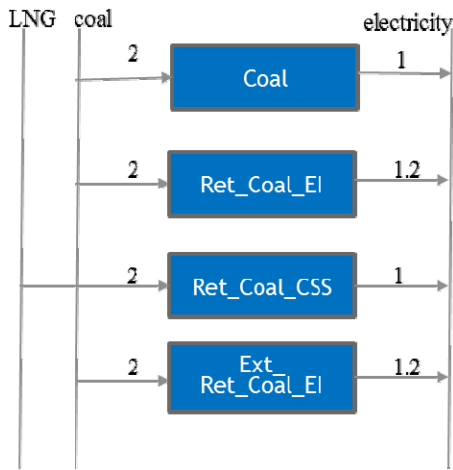
클수록 본 연구의 효용가치는 높아진다.

3.2 수명연장

수명연장, 용량확대 및 공사기간 등 리트로핏의 부수효과를 반영하기 위한 모형은 Chung et al. (2019)의 연구결과를 차용하였다.

먼저, 많은 문헌에서 리트로핏으로 단순히 효율개선만 이루어지는 것이 아니라 수명연장이라는 부수적인 효과를 얻을 수 있다고 언급하고 있다(송명훈, 2015, Chung et al., 2019). 잔존수명 기간동안 효율개선의 효과만 얻는 것이 아니라 리트로핏된 설비를 더 오랫동안 사용할 수 있다면 더 경제적인 선택이 될 수 있으며 모형에서 이를 적절하게 반영하여야 한다. 예를 들어, 리트로핏 후보기술인 ‘Ret_Coal_EI’로 리트로핏 했을 때 ‘M’년의 수명연장이 된다고 가정하자. 이를 위하여 본 연구에서는 <그림 5>에서와 같이 연장된 수명동안 가동될 수 있는 별도의 기술(‘Ext_Ret_Coal_EI’)을 정의한

다. 기술 ‘Ext_Ret_Coal_EI’의 수명은 ‘M’년이 고 식 (7)과 같이 리트로핏된 ‘Ret_Coal_EI’이 폐기되는 시점에 ‘Ext_Ret_Coal_EI’기술이 신규 설치되도록 한다. 또한, 기술 ‘Ext_Ret_Coal_EI’의 투자비는 0원으로 설정된다. 나머지 운영비용, 입출력과 관련된 파라메타 등 기술관련 특성은 ‘Ret_Coal_EI’과 동일하게 설정한다.



<그림 5> 수명연장 RES

$$\text{NewCapacity}(y, \text{'Ext_Ret_Coal_EI'}) = \text{RetireCapacity}(y, \text{'Ret_Coal_EI'}) \quad (7)$$

3.3 공사기간 및 용량확대

리트로핏 공사에 M년이 소요된다고 하면 이 기간 동안에는 해당설비는 가동할 수 없으며 전력의 경우 예비전력(reserving power)으로도 사용할 수 없다는 것을 의미한다. 특히 석탄화력 발전소의 경우 운전예비력(operation reserve)으로 사용할 수 있기 때문에 발전량과 관계없이 전력공급의 안정성 측면에서 그 중요도는

상당히 높다고 할 수 있다.

이는 리트로핏이 단순히 공사기간의 가동중단만을 의미하는 것이 아니라 이에 따른 과급효과가 매우 클 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 리트로핏 공사기간을 적절하게 모형에서 반영하여만 그 과급효과를 정확하게 계산할 수 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 리트로핏 대안 기술에 대하여 $\text{PreviousNewCapacity}(y,t)$, $\text{PreviousTotalCapacityAnnual}(y,t)$ 를 정의한다. 즉, 신규 설비용량을 나타내는 변수는 두 개가 있는데 $\text{NewCapacity}(y,t)$ 는 공사기간이나 용량확대가 적용된 리트로핏 된 후의 실제 용량을 나타내고 $\text{PreviousNewCapacity}(y,t)$ 는 이런 효과가 적용되지 않은 리트로핏 전의 용량을 나타낸다. 아래에서 추가된 식 (6)은 $\text{PreviousNewCapacity}(y,t)$ 와 $\text{NewCapacity}(y,t)$ 간의 관계식을 나타낸다.

총 용량을 나타내는 변수도 두 개가 있는데 $\text{TotalCapacityAnnual}(y,t)$ 는 리트로핏에 따른 공사기간이 반영된 용량이고 $\text{PreviousTotalCapacityAnnual}(y,t)$ 는 공사기간이나 용량확대 등의 리트로핏 효과가 적용되지 않은 용량을 나타낸다. 아래에서 식 (2)과 (3)는 각각 두 리트로핏 후보기술의 $\text{TotalCapacityAnnual}(y,t)$ 에 대한 정의를 나타내고, 식 (2')과 (3')는 각각 두 리트로핏 후보기술의 $\text{PreviousTotalCapacityAnnual}(y,t)$ 에 대한 정의를 나타낸다.

두 변수의 도입으로 식 (1)는 리트로핏 후보 기술에 대한 $\text{TotalCapacityAnnual}(y,t)$ 대신에 $\text{PreviousTotalCapacityAnnual}(y,t)$ 가 사용된 식 (1')으로 변경된다. 반면, 두 변수와 관계가 없는 (2), (3), (4), (5)는 변동없이 기존의 식과 동

일하게 유지된다.

$$\begin{aligned} \text{TotalCapacityAnnual}(y, 'Coal') &= \sum_{i=1}^y \text{NewCapacity}(i, 'Coal') + \text{ResidualCapacity} \\ &(y, 'Coal') - \text{PreviousTotalCapacityAnnual} \\ &(y, 'Ret_Coal_EL') - \text{PreviousTotalCapacityAnnual} \\ &(y, 'Ret_Coal_CCS') \end{aligned} \quad (1')$$

$$\begin{aligned} \text{TotalCapacityAnnual}(y, 'Ret_Coal_EL') &= \sum_{i=1}^y \text{NewCapacity}(i, 'Ret_Coal_EL') - \sum_{i=1}^y \\ &\text{ResidualCapacity}(i, 'Ret_Coal_EL') \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{TotalCapacityAnnual}(y, 'Ret_Coal_CCS') &= \\ &\sum_{i=1}^y \text{NewCapacity}(i, 'Ret_Coal_CCS') - \\ &\sum_{i=1}^y \text{RetireCapacity}(i, 'Ret_Coal_CCS') \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{PreviousTotalCapacityAnnual}(y, 'Ret_Coal_EL') \\ &= \sum_{i=1}^y \text{PreviousNewCapacity} \\ &(i, 'Ret_Coal_EL') - \sum_{i=1}^y \text{RetireCapacity} \\ &(i, 'Ret_Coal_EL') \end{aligned} \quad (2')$$

$$\begin{aligned} \text{PreviousTotalCapacityAnnual} \\ &(y, 'Ret_Coal_CCS') = \sum_{i=1}^y \text{PreviousNew} \\ &\text{Capacity}(i, 'Ret_Coal_CCS') - \sum_{i=1}^y \text{Retire} \\ &\text{Capacity}(i, 'Ret_Coal_CCS') \end{aligned} \quad (3')$$

$$\begin{aligned} \text{ResidualCapacity}(y, 'Coal') - \text{PreviousTotal} \\ &\text{CapacityAnnual}(y, 'Ret_Coal_EL') - \text{Previous} \\ &\text{TotalCapacityAnnual}(y, 'Ret_Coal_CCS') \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ResidualCapacity}(y, 'Coal') - \text{ResidualCapacity} \\ &(y-1, 'Coal') \geq \text{ResidualCapacity} \\ &(y, 'Ret_Coal_EL') + \text{ResidualCapacity} \\ &(y, 'Ret_Coal_CCS') \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{NewCapacity}(M+y, 'Ret_Coal_EL') = \\ \text{PreviousNewCapacity}(y, 'Ret_Coal_EL') \end{aligned} \quad (6)$$

공사기간과 더불어 리트로핏으로 용량확대 효과가 있을 경우, 식 (6)은 다음과 같이 식 (6')으로 변경된다. 여기서 CER(capacity expansion ratio)은 용량확대비율을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{NewCapacity}(M+y, 'Ret_Coal_EL') = \\ \text{PreviousNewCapacity}(y, 'Ret_Coal_EL') \\ \times (1 + \text{CER}) \end{aligned} \quad (6')$$

3.4 리트로핏 순서

기술을 플랜트 단위로 구분을 하게 되면 모형의 크기가 커지고 따라서 문제의 복잡성이 높아지기 때문에 일반적으로 동일한 연료를 사용하거나 유사한 발전특성을 가진 플랜트를 하나로 묶어 분류하고 있다. 앞서 석탄발전소를 대표하는 기술로 나타난 'Coal' 기술도 설치연도나 잔존수명과 관계없이 유연탄을 연료로 사용하는 발전소를 모두 포함하고 있다. 발전효율과 잔존수명 등 여러 가지 특성이 다른 발전소를 하나의 기술로 표현하는 일반화가 통상적인 GCEP 모형에서는 크게 문제가 되지 않지만 리트로핏 모형에서는 심각한 왜곡을 발생시킨다. 즉 리트로핏 전력모형의 결과들이 상식과는 어긋나는 의사결정을 하는 경우가 발생하기 때문이다. 예를 들어, 잔존수명이 각각 5년, 20년인 두 발전소가 있는데 이들은 모두 'Coal' 기술로 표현된다. 석탄발전소에 대하여 리트로핏 결정을 했다고 하면 일반적으로 잔존수명이 5년으로 수명이 다한 발전소에 대한 리트로핏을 예상하겠지만 GCEP 모형은 잔존 수명이 20년인 발전소의 리트로핏을 선택하고 있다. 왜냐하면 모형에서 두 발전소는 잔존수명 이외에는 동일

한 특성을 가지고 있는데 비용이 수반되는 리트로핏의 효과를 5년동안 취하는 것보다는 20년 동안 리트로핏 효과를 보는 것이 더 효율적이기 때문이다.

이와 같이 잔존수명이 긴 플랜트가 먼저 리트로핏되는 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 석탄발전소를 잔존수명에 따라 세분화하고 잔존수명이 짧은 발전소가 긴 발전소보다 먼저 리트로핏되도록 하는 제약식을 추가하고자 한다.

먼저 위의 방정식에서 기술 이름 뒤에 숫자를 추가하여 기술을 잔존수명에 따라 세분화한다. 즉, 'Coal'은 Coal05', 'Coal10', 'Coal15', 'Coal20', 'Coal25'로 세분화되고 이는 각각 잔존수명이 5년이하, 10년이하, 15년이하, 20년이하, 20년초과인 기존의 석탄발전소를 의미한다. 마찬가지로 'Ret_Coal_EI'는 'Ret_Coal_EI05', 'Ret_Coal_EI10', 'Ret_Coal_EI15', 'Ret_Coal_EI20', 'Ret_Coal_EI25'로 세분화되고 Ret_Coal_CCS는 'Ret_Coal_CCS05', 'Ret_Coal_CCS10', 'Ret_Coal_CCS15', 'Ret_Coal_CCS20', 'Ret_Coal_CCS25'로 세분화된다. 따라서, 리트로핏을 반영하기 위한 (1) ~ (5)까지의 식은 기술 이름 뒤에 숫자가 붙은 식으로 변환되고 방정식도 5배로 많아지게 된다.

또한, 리트로핏 순서를 강제하기 위하여 아래와 같은 제약식이 추가된다. 선형 방정식으로 리트로핏 순서를 강제할 수 없기 때문에 본 연구에서는 이진변수를 도입하여 리트로핏 순서에 대한 제약을 추가하였다. 아래 제약식은 잔존수명 5년이하 발전소가 모두 리트로핏 되어야만 잔존수명 10년 이하 발전소가 리트로핏 대상이 된다는 것을 나타낸다. 여기서 $a_{05}(y)$ 는

이진변수로써 1이면 년도에 잔존수명 5년이하 발전소는 모두 리트로핏 되어 잔존수명 10년 이하 발전소가 리트로핏 될 수 있음을 나타낸다. bigM은 큰 수를 의미한다. 즉, 식 (8)에서 왼쪽 항이 0이 아니면 $a_{05}(y)$ 가 0이 되어야 하고 따라서 식 (9)에 왼쪽 항은 0이 되어야 한다. 이는 기준시점의 잔존수명이 5년이하인 발전소의 잔존용량 중에서 리트로핏 되지 않고 남은 것이 있다면 잔존수명이 10년이하인 발전소는 리트로핏 대상이 될 수 없다는 것을 의미한다. 반대로, 식 (8)의 왼쪽 항이 0이 되는 경우 즉, 5년이하인 발전소의 잔존용량 모두 리트로핏 되었다면 $a_{05}(y)$ 가 1이 될 수 있고 이때 식 (9)에서 잔존수명 10년이하 발전소 중에서 리트로핏 대상이 될 수 있음을 의미한다.

$$\begin{aligned} & \text{ResidualCapacity}('0', 'Coal05') - \sum_{i=1}^y \text{PreviousNewCapacity}(i, 'Ret_Coal_EI05') \\ & - \sum_{i=1}^y \text{PreviousNewCapacity}(i, 'Ret_Coal_CCS05') \leq (1 - a_{05}(y)) \cdot \text{bigM} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^y \text{PreviousNewCapacity}(i, 'Ret_Coal_EI10') + \sum_{i=1}^y \text{PreviousNewCapacity}(i, 'Ret_Coal_CCS10') \\ & \leq a_{05}(y) \cdot \text{bigM} \end{aligned} \quad (9)$$

IV. 다중대안 리트로핏 사례연구

본 연구에서 제시하는 다중대안 리트로핏 모형을 실험하기 위하여 국내 전력부문의 실제 데이터를 사용하였다. GCEP는 방대한 데이터

를 기반으로 하고 있으며 국가적 정책이나 기술적인 한계점 등에 따라 제약식이 매우 복잡하게 구성되어 있으나 본 연구의 주 관심사가 아니기 때문에 상세하게 기술하지 않고 대신 기존연구(정용주, 2019; Chung et al., 2019)에서 제시된 모형과 자료를 참조하도록 한다. 본 연구의 주된 관심사인 리트로핏의 대상이 되는 기존 석탄발전소 관련 자료 및 효율향상, CCS 등 리트로핏 대안과 관련된 데이터는 상세하게 기술한다.

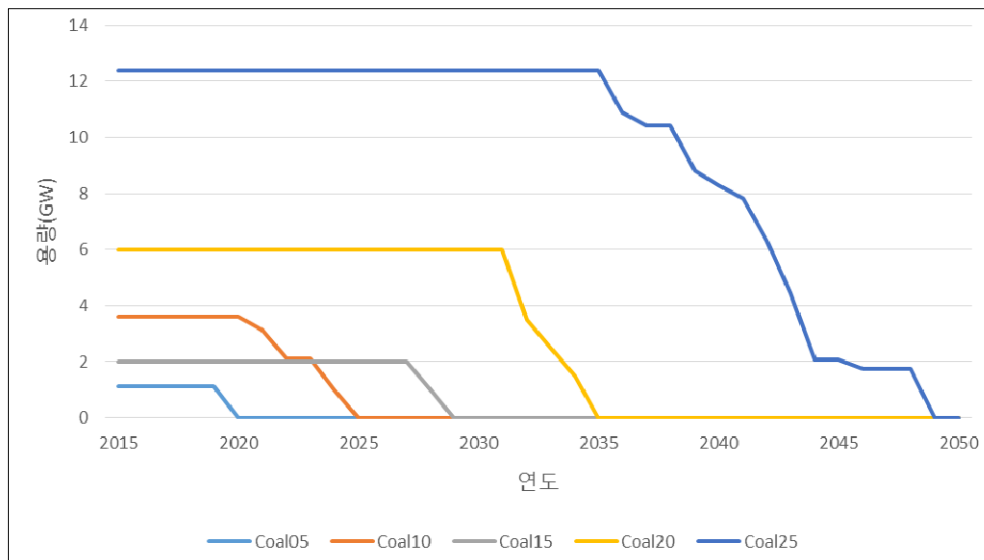
<표 2>는 리트로핏의 대상이 되는 기존 석탄발전소의 효율과 비용과 관련된 정보를 나타낸다. 표에서도 알 수 있듯이 비용은 잔존수명과

관계없이 동일하지만 효율은 잔존수명이 짧을수록 즉, 노후화가 많이 진행될수록 효율은 떨어지는 것으로 가정하였다. 또한, <그림 6>은 잔존수명별 잔존용량을 나타낸다. 그림에서 선이 아래로 꺾어지는 지점은 발전소의 폐기시점을 나타내고 내려간 폭이 폐기 용량을 나타낸다. 예를 들어 잔존수명이 5년이하인 발전소의 용량은 기준년도 2015년에 1.12GW이고 이들은 모두 2019년에 폐기된다.

리트로핏 대안기술의 비용과 효과에 대한 정보는 <표 3>에 요약하였다. 효율향상이 주목적인 Ret_Coal_EI의 리트로핏 비용은 기존 석탄발전소의 투자비의 10%이고 고정운영비는 기

<표 2> 기존 석탄발전소 분류 및 상세내용

| | Coal05 | Coal10 | Coal15 | Coal20 | Coal25 |
|----|--|--------|--------|--------|--------|
| 효율 | 35% | 36% | 37% | 38% | 39% |
| 비용 | 투자비 : 1,410 십억원/GW 고정운영비 : 49십억원/GW 변동운영비 : 0원/GWh | | | | |



<그림 6> 기존 석탄발전소 잔존 용량(Residual Capacity)

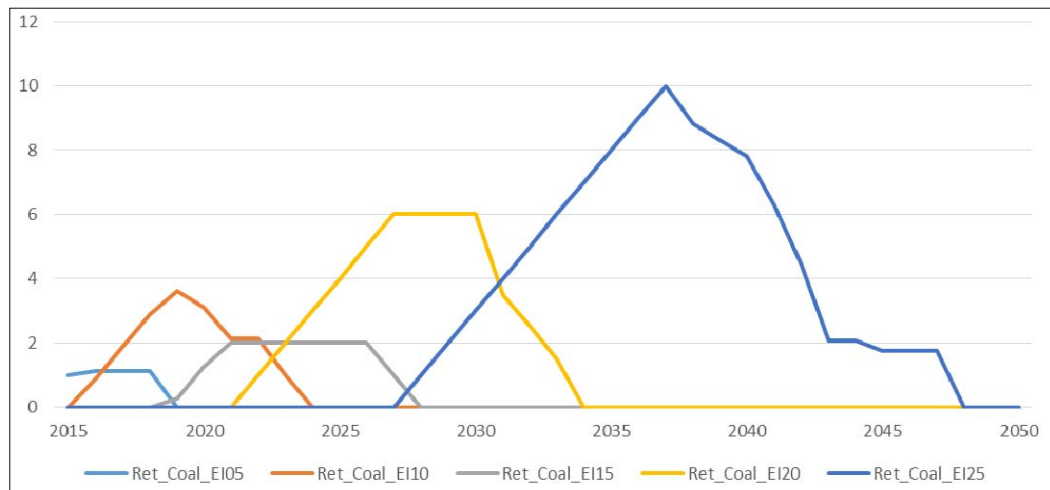
존 석탄발전소와 동일하다. 또한, Ret_Coal_EI는 기존 석탄발전소 대비 약 20% 정도의 효율 향상 효과가 있는 것으로 가정하였다(송병훈, 2015; Chung et al., 2019). 반면 온실가스 포집이 주목적인 Ret_Coal_CCS의 리트로핏 비용은 기존 석탄발전소의 투자비의 50%이고 고정운영비는 기존 석탄발전소와 동일한 것으로 가정하였다. 또한 이산화탄소 1톤을 포집하는데 드는 비용은 3만원으로 가정하였다(장경룡 등, 2016; 이지현 등, 2016).

또한 현실적인 공사 여건을 감안하여 1년에 리트로핏될 수 있는 용량을 1GW 이하가 되도록 하는 제약식을 추가하고 리트로핏되고 폐기되는 패턴을 분석하였다. <그림 7>은 탄소세가

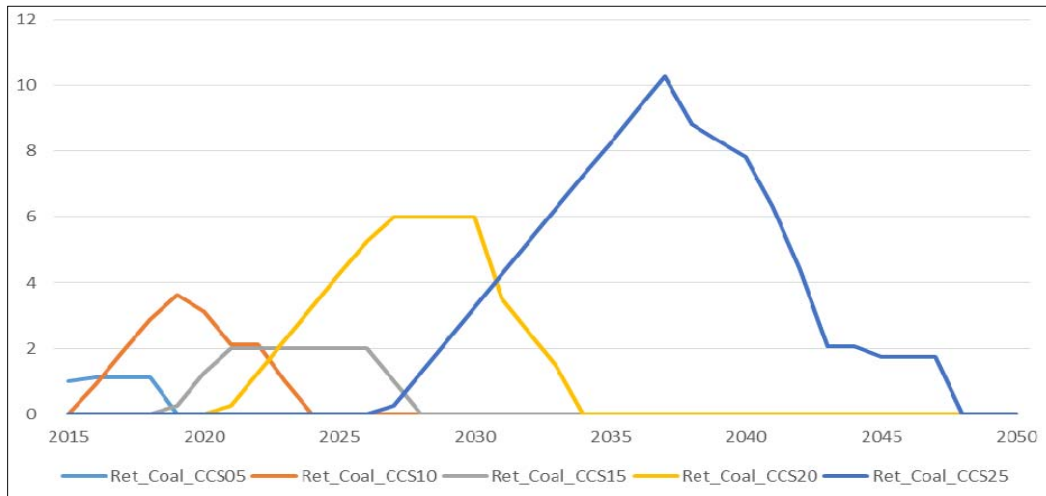
0원/톤인 경우에 리트로핏 용량의 변화를 나타낸다. 그림에서 그래프가 위로 올라가는 것은 새로운 리트로핏이 이루어졌음을 의미하고 아래로 꺾어지는 것은 폐기를 나타낸다. 예를 들어, 그림에서 Ret_Coal_EI05는 2015년에 1GW, 2016년에 0.12GW 리트로핏되어 가동되다가 2019년에 폐기된다. 이제 리트로핏 순서가 제대로 이루어지고 있는지를 확인하고자 한다. Ret_Coal_EI10은 Ret_Coal_EI05가 모두 리트로핏된 2016년에야 처음으로 리트로핏되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, Ret_Coal_EI15은 Ret_Coal_EI10가 모두 리트로핏된 2019년에야 처음으로 리트로핏되고 있음을 확인할 수 있다. 효율향상과 CCS 두 개의

<표 3> 리트로핏 대안 기술

| | Ret_Coal_EI05 ~ Ret_Coal_EI25 | Ret_Coal_CCS05 ~ Ret_Coal_CCS25 |
|----|--|---|
| 비용 | 투자비 : 기존 석탄발전소 투자비의 10% (141십억원/GW) 고정운영비 : 기존 석탄발전소와 동일(49십억/GW) | 투자비 : 기존 석탄발전소 투자비의 50% (705십억원/GW) 고정운영비 : 기존 석탄발전소와 동일(49십억/GW) 이산화탄소 포집 및 처리비용 : (3만원/톤) |
| 효과 | 효율향상 (효율 = 47.75%) | 이산화탄소 감축 |



<그림 7> 리트로핏 용량의 변화 (탄소세: 0원/톤)



<그림 8> 리트로핏 용량의 변화 (탄소세: 5만원/톤)

리트로핏 대안 중에서 효율향상만 선택되고 CCS 리트로핏은 선택되지 않았다. 이는 CCS가 효율향상 리트로핏 보다 많은 공사비가 소요되고 또한 이산화탄소를 포집하는데 추가적인 비용이 수반되기 때문에 경제적인 면에서 열위에 있기 때문이다.

<그림 8>은 탄소세가 5만원/톤인 경우에 리트로핏 용량의 변화를 나타낸다. <그림 7>과 비교해 보면 효율향상 리트로핏 대신에 CCS 리트로핏이 선택되었음을 알 수 있다. CCS로 이산화탄소를 1톤 포집하는데 3만원의 비용이 추가되지만 탄소세를 회피함으로써 톤당 2만원의 이득을 보게 되어 효율향상 리트로핏 보다 는 CCS 리트로핏이 더 경제적인 대안이 된다는 것을 확인할 수 있었다.

다수의 실험과정을 통하여 비용을 최소화하고자 하는 GCEP의 특성상 여러 개의 리트로핏 대안이 있더라도 그 중에 하나의 대안만 선택 된다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, CCS 리트로핏은 포집 이산화탄소 톤당 비용이 발생하기

때문에 효율향상, 수명연장 등의 다른 부수적인 효과가 없고 탄소세가 부과되지 않는 상황에서는 절대로 도입되지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 오픈소스인 OSeMOSYS를 활용하여 리트로핏 대안이 여러 개인 경우에 GCEP를 모형화하기 위한 방법론을 제시하였다. 미세먼지 발생, 설비의 노후화 등으로 대책이 필요한 석탄발전소에 대하여 효율향상 리트로핏, CCS 리트로핏, 연료대체 리트로핏 등 여러 개의 대안이 있는 경우 다수의 대안을 동시에 비교하고 가장 경제적인 대안을 선택할 수 있도록 한다. 또한, 다중 대안 리트로핏을 GCEP에서 모형화하는 경우 최적화 문제의 특성으로 잔존수명이 긴 발전소가 짧은 발전소보

다 먼저 리트로핏되는 문제점을 해결하기 위하여 리트로핏 대상이 되는 발전소를 잔존수명으로 세분화하고 이진변수가 수반되는 제약식을 추가하였다.

국내 전력부문과 관련된 현실데이터를 바탕으로 본 연구에서 제시하는 다중 대안 리트로핏 모형을 구현하고 실험하였다. 다수의 실험을 통하여 본 연구에서 제시하고 있는 방법론이 제대로 작동하여 여러 개의 대안을 동시에 평가하고 가장 경제적인 대안을 선택하고 있으며, 상대적으로 잔존수명이 짧은 발전소가 모두 리트로핏된 다음에 잔존수명이 긴 발전소가 리트로핏 대상이 되어 리트로핏 순서 문제를 해결하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 리트로핏 비용, 리트로핏 효과와 더불어 탄소세가 리트로핏 대안 선택에 영향을 미치는 요인으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구는 리트로핏 대안이 여러 개인 상황에서 이들을 동시에 평가하고 가장 경제적인 리트로핏 의사결정을 하기 위한 GCEP을 수리적으로 모형화한 최초의 시도로서 그 의미가 있다. 또한, 리트로핏 모형에서 수반되는 잔존수명이 긴 발전소가 먼저 리트로핏되는 순서문제를 아주 간단한 제약식 추가로 해결하였다. 동일한 종류의 석탄 발전소를 잔존수명에 따라 여러 개의 기술로 세분화하고 잔존 수명마다 별도의 대안 기술들을 도입함에 따라 모형이 다소 복잡해지는 단점을 지니고 있다. 모형의 높아진 복잡도와 더불어 이진변수 도입으로 문제의 난이도는 높아졌지만 실제 국내사례를 바탕으로 하는 GCEP 문제에 대한 컴퓨터 실행시간도 10초 이내로 짧아 모형의 현실적 활용가능성은 매우 높은 것으로 판단된다.

참고문헌

- 장경룡, 이정현, “탄소포집 및 저장 레트로핏 연구 : 중국의 사례를 중심으로”, *News & Information for Chemical Engineers*, 34 권 6호, 2016, pp. 661-666.
- 이지현, 광노상, 이동욱, 심재구, 이정현, “CCS (Carbon Capture & Sequestration) 기술 경제성 평가”, *Journal of Climate Change Research*, 7권 2호, 2016, pp. 111-120.
- 송병훈, “500MW급 표준석탄화력 Retrofit 실증 사업”, *기계저널*, 55권 9호, 2015, pp. 41-44.
- 정용주, “오픈 소스 최적화모형을 이용한 지역 단위 전력계획”, *정보시스템연구*, 28권 1호, 2019, pp. 133-153.
- 이종화, 이현규, “오픈소스 소프트웨어를 활용한 자연어 처리 패키지 제작에 관한 연구”, *정보시스템연구*, 25권 4호, 2016, pp. 121-139.
- Gardumi, F., “A Multi-Dimensional Approach to the Modeling of Power Plant Flexibility”, Ph.D. Dissertation, Politecnico Di Milano, Milano, Italy, 2016.
- Yongjoo Chung, Chunhyun Paik, and Youngjin Kim, “Open Source-based Modeling of Power Plants Retrofit and its application to the Korean Electricity Sector”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 81, 2019, pp. 21-28.

Matthias Finkenrath, Julian Smith and Dennis Volk: “CCS Retrofit : Analysis of the Globally Installed Coal-Fired Power Plant Fleet”, IEA, 2012.

Retrofitting of Coal-Fired Power Plants for CO2 Emissions Reductions, MIT Energy Initiative Symposium, 2009.

The UK MARKAL Documentation Residential Sector Module, 2007.

Lukas G. Swan, V. Ismet Ugursal, “Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009, pp. 1819-1835.

Carol Lenox, Rebecca Dodder, Cynthia Gage, Ozge, U.S. Nine-region MARKAL DATABASE, EPA, 2013.

R. Kannan, N. Strachan, “Modelling the UK residential energy sector under long-term decarbonisation scenarios: Comparison between energy systems and sectoral modelling approaches”, *Applied Energy*, Vol. 86, 2009, pp. 416-428

<http://epsis.kpx.or.kr>

제8차 전력수급기본계획, 산업통상자원부, 2018.
한국중부발전 블로그

(<https://blog.komipo.co.kr/581>)

<http://www.gams.com>

<https://www.ibm.com/kr-ko/products/ilog-cplex-optimization-studio>

<http://www.osemosys.org>

정용주 (Chung, Yong Joo)



연세대학교 경영학과와 한국과학기술원 석사와 박사학위를 취득하였다. 현재 부산외국어대학교 G2융합학부 교수로 재직하고 있으며, 주요 관심분야는 온실가스모형, 에너지 최적화모형, 모바일 비즈니스 등이다.

<Abstract>

Multi-alternative Retrofit Modelling and its Application to Korean Generation Capacity Expansion Planning

Chung, Yong Joo

Purpose

Retrofit, defined to be addition of new technologies or features to the old system to increase efficiency or to abate GHG emissions, is considered as an important alternative for the old coal-fired power plant. The purpose of this study is to propose mathematical method to model multiple alternative retrofit in Generation Capacity Expansion Planning(GCEP) problem, and to get insight to the retrofit patterns from realistic case studies.

Design/methodology/approach

This study made a multi-alternative retrofit GECP model by adopting some new variables and equations to the existing GECP model. Added variables and equations are to ensure the retrofit feature that the life time of retrofitted plant is the remaining life time of the old power plant. We formulated such that multiple retrofit alternatives are simultaneously compared and the best retrofit alternative can be selected. And we found that old approach to model retrofit has a problem that old plant with long remaining life time is retrofitted earlier than the one with short remaining life time, fixed the problem by some constraints with some binary variables.

Therefore, the proposed model is formulated into a mixed binary programming problem, and coded and run using the GAMS/cplex.

Findings

According to the empirical analysis result, we found that approach to model the multiple alternative retrofit proposed in this study is comparing simultaneously multiple retrofit alternatives and select the best retrofit satisfying the retrofit features related to the life time. And we found that retrofit order problem is cleared. In addition, the model is expected to be very useful in evaluating and developing the national policies concerning coal-fired power plant retrofit.

Keyword: Retrofit, Generation Capacity Expansion Planning, Green House Gas, Optimization Model

* 이 논문은 2020년 1월 13일 접수, 2020년 1월 28일 1차 심사, 2020년 2월 3일 2차 심사, 2020년 2월 12일 게재 확정되었습니다.